

О МОДЕЛИРОВАНИИ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ ОТКАЗОВ В НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ И ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ СИСТЕМАХ

О. Г. Бойко*, Е. А. Ачкасова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: bouko1962@yandex.ru

Объектом исследования являются сложные функциональные системы воздушных судов. Предмет исследования включает методологический подход к расчету безотказности рассматриваемых систем. Темой статьи является развитие методов оценки безотказности сложных систем. Цель статьи заключается в исследовании правомерности и адекватности методологического подхода традиционной теории надежности в расчетах восстанавливаемых резервированных систем.

К традиционным относятся методы, основанные на использовании теоремы умножения вероятностей. В постановочной части решения задачи расчета безотказности рассматриваемых систем указываются условия, выполнение которых определяет отказ системы. В процессе решения задач традиционными методами эти условия игнорируются. Показано, что по традиционному решению системы отказывают только при условии отказа всех элементов. При расчете мажоритарной системы вероятность ее отказа определяется суммированием вероятностей отказа по двум состояниям. Причем предполагается, что второй отказ реализуется в уже ранее отказавшей системе. Отказы элементов, определяющие потерю работоспособности системы, реализуются в дискретные моменты времени, но при традиционном решении дискретность не учитывается.

Предлагаемый методологический подход основан на представлении о том, что при стационарном процессе вероятность отказа элемента в работоспособной части системы определяется суммарной плотностью вероятности потоков отказов элементов, составляющих эту часть системы, и их предшествующей наработкой.

При решении задач расчета безотказности рассматриваемых систем по предложенным методам теорема умножения вероятностей не используется. Определяются временные интервалы, на которых элементы системы отказывают и снижают ее работоспособность. Предлагаются решения с учетом изменения структуры системы по мере развития в ней отказов.

Результаты, полученные по предлагаемому подходу, строго соответствуют условиям отказов систем. Правомерность подхода подтверждена результатами экспериментальных исследований. Предлагаемые методы могут быть использованы при расчетах безотказности функциональных систем самолетов и космических аппаратов.

Ключевые слова: восстанавливаемая система, сложная система, вероятность отказа, плотность потока отказов элементов, дискретность отказов.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 834–840

MODELING OF THE FAILURE FORMATION MECHANISM IN NON-RECOVERABLE AND RECOVERABLE SYSTEMS

O. G. Boyko*, E. A. Achkasova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: bouko1962@yandex.ru

In this article, the object of research is complex functional aircraft systems. The subject of the study includes a methodological approach to systems reliability calculation. The theme of this work is development of the methods for the complex systems reliability assessing. The aim of this work is to study the validity and adequacy of the methodological approach to the traditional reliability theory in the calculations of recoverable redundant systems.

Traditional methods include the methods that are based on the use of the multiplication theorem of probabilities. In the production section of faultlessness calculating solving problem are the conditions for the system failure of. These conditions are ignored, using traditional methods of solving problems. It is shown that according to the traditional solution, systems are only refused if all elements fail. When calculating the majority system, probability of its failure is determined by summing the failure probability for two states. And it is assumed that the second refusal is realized in the

previously failed system. Failures of elements that determine the loss of system performance are realized at discrete instants of time, but, with the traditional solution, discreteness is not taken into account. The methodological approach proposed by the authors is based on the notion that, in a stationary process, the failure probability of an element in the operable part of the system is determined by the total density probability of the failure streams of the elements making up this part of the system and their previous generation.

Using the methods proposed by the authors for solving the problems of reliability calculating of these systems, the theorem of multiplying probabilities is not used. Time intervals are determined on which the elements of the system fail, and reduce its efficiency. Taking into account changes in the system structure, solutions are proposed as the failure in it develops.

The results obtained according to the proposed approach strictly correspond to the failure conditions of the systems. The validity of the approach is confirmed by the results of experimental studies. The methods proposed in the work can be used in calculating the reliability of functional systems of aircraft and spacecraft.

Keywords: recoverable system, complex system, the failure probability, density of failure flow of elements, discreteness of failures.

Введение. По принципу поддержания надежности различают восстанавливаемые и невосстанавливаемые системы. Функциональные системы, отказы которых приводят к большим потерям, как правило, выполняют и резервированными, и восстанавливаемыми. В авиации восстановление систем в случае отказов их элементов в полете выполняется после посадки. Но за время полета с отказавшим элементом возможны отказы и в остальных резервных подсистемах. В работах [1–3] показано, что авиационные системы вследствие восстановления элементов не стареют более чем на 60 %.

В традиционной теории надежности расчет безотказности систем основан на применении теоремы умножения вероятностей, и в конечной модели отсутствует учет дискретности состояний систем. Это приводит к игнорированию постулата Макса Планка [4] о дискретности состояний систем со всеми вытекающими негативными последствиями. Всестороннее исследование недостатков традиционной теории надежности систем приведено в [5; 6].

В работах [7; 8] предложен подход к расчету безотказности систем без использования теоремы умножения вероятностей, в котором учитывается дискретность состояний систем. Он основан на представлении о том, что вероятность реализации первого отказа в системе определяется суммарным параметром потоков отказов всех элементов, составляющих ее работоспособную часть, и их предшествующей наработкой. На основании подхода разработаны методы для расчета безотказности систем с различным типом резервирования. В [9] приведены результаты экспериментальной проверки разработанных методов. Предлагаемые методы обеспечивают возможность расчета наработок системы, на которых реализуются отказы элементов, и исследование механизмов отказа системы.

Целью данной статьи является анализ моделей развития отказов в функциональных системах при различных подходах.

Механизм развития отказов в системе с параллельным соединением. Рассмотрим моделирование изменения безотказности в невосстанавливаемой системе с параллельным соединением элементов при традиционном [10–13] и предложенном в [7; 8] подходах. Структурная схема системы из пяти парал-

лельно соединенных одинаковых элементов приведена на рис. 1.

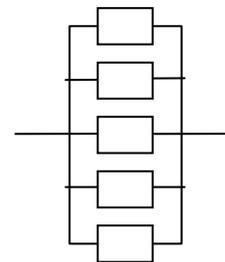


Рис.1. Структурная схема системы с параллельным соединением

Fig.1. The system structural scheme with parallel connection

При традиционном подходе изменение вероятности отказа $Q(t)$ такой системы выразится в виде

$$Q(t) = q(t)^5. \quad (1)$$

При стационарном режиме эксплуатации вероятность отказа элементов $q(t)$ системы допускается моделировать распределением равномерной плотности вида

$$q(t) = \begin{cases} f(t) \cdot t, & \text{где } 0 \leq t \leq 2T_{cp}, \\ 1, & \text{где } t \geq 2T_{cp}, \end{cases} \quad (2)$$

где $f(t)$ – плотность распределения; T_{cp} – средняя наработка элемента на отказ (матожидание времени отказа):

$$f(t) = \begin{cases} 0, & \text{где } t < 0, \quad t > 2T_{cp}, \\ \frac{1}{2T_{cp}} = 0,5\omega, & \text{где } 0 \leq t \leq 2T_{cp}. \end{cases} \quad (3)$$

Тогда в соответствии с (1)–(3) при стационарном режиме вероятность отказа системы определится как

$$Q(t) = q(t)^5 = (f \cdot t)^5.$$

На рис. 2 штрихпунктирной линией приведена функция распределения вероятности отказа рассматриваемой системы, построенная по выражению (1) с учетом (2).

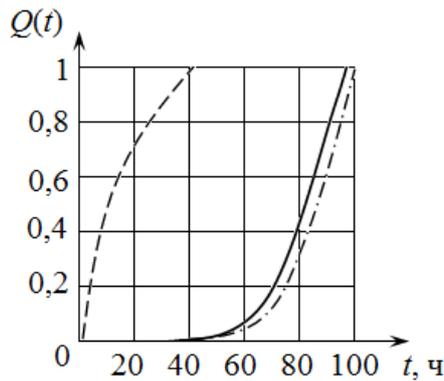


Рис. 2. Функции распределения вероятности отказа системы из 5 параллельно соединенных элементов, построенные при $f = 0,001 \text{ ч}^{-1}$ (традиционный подход):
 — экспериментально по методу Монте-Карло;
 - - - экспериментально по методу Монте-Карло для отказа первого элемента; - · - · - по традиционному методу расчета

Fig. 2. The probability distribution functions for the system failure of 5 parallel-connected elements constructed at $f = 0,001 \text{ h}^{-1}$:
 — experimentally using the Monte-Carlo method;
 - - - experimentally using the Monte-Carlo method for the failure of the first element; - · - · - according to the traditional method of calculation

Проверка результатов моделирования. Для проверки результатов моделирования расчета по (1) выполнен численный эксперимент методом Монте-Карло по имитации процесса работы системы до отказа [7]. Каждый опыт состоял в задании пяти значений случайных чисел в интервале от 0 до 1, которые отождествлялись с вероятностями отказа элемента. На основании вероятностей по функции распределения $q(t)$ определялись времена отказов. В каждом опыте система отказывает только по достижении последним элементом наибольшей наработки. Выполнено число опытов, достаточное для представительной выборки. По результатам испытаний получен простой статистический ряд наработок. По этой статистике построена функция распределения вероятности отказа системы, приведенная на рис. 2 сплошной линией. Сходимость расчетных и экспериментальных значений более чем удовлетворительная. Вместе с этим остается нераскрытым механизм изменения структуры системы за счет отказов элементов.

Рассмотрим результат такого моделирования. В соответствии с выражением (1) можно сделать вывод, что система отказывает вследствие одновременного отказа всех составляющих ее элементов. Но это далеко не так. Результаты численного моделирования обеспечивают возможность построения функций распределения вероятностей первого, второго, третьего и четвертого отказов в системе. Для примера на рис. 2 пунктирной линией показана функция распределения вероятности первого отказа среди элементов системы. В соответствии с ней первый отказ среди одинаковых элементов реализуется на отрезке $[0, 40]$ часов. Таким образом, очевидно, что при моделировании необходимо учитывать то, что отказ каждого последующего элемента увеличивает вероятность отказа системы и вызывает изменение структуры ее работоспособной части. Но в выражении (1) этот механизм отказа сис-

темы никак не отражен. В соответствии с изложенным, функция распределения вероятности отказа, приведенная на рис. 2, является таковой именно для отдельного наиболее надежного элемента системы, но не для самой системы. В пользу этого говорит и тот факт, что плотность вероятности потока отказов в системе в соответствии с (1) близка к 0 на начальном этапе ее работы, когда суммарная плотность потока отказов составляющих ее элементов максимальна.

Таким образом, в системе с параллельным соединением одинаковых элементов при увеличении их числа увеличивается наработка системы до отказа. Это является следствием того, что при выборе элементов из генеральной совокупности наугад увеличивается вероятность появления в структуре системы элемента с наибольшей наработкой до отказа.

Рассмотрим результат моделирования процесса отказов в системе по методу, изложенному в [7; 8]. Вероятность первого отказа в системе (см. рис. 1) определится в виде

$$q_1(t) = f_{\Sigma} \cdot t, \tag{4}$$

где f_{Σ} – суммарная плотность потока отказов элементов. Для рассматриваемой системы $f_{\Sigma} = 5f$.

Поскольку первый отказ в системе – событие достоверное, то, положив $q_1(t) = 1$, определим верхнюю границу интервала $[0, t_1]$, на котором откажет один из элементов системы. Тогда граница интервала первого отказа в системе выразится как

$$t_1 = \frac{1}{f_{\Sigma}}. \tag{5}$$

Вероятность отказа второго элемента определится с учетом изменения структуры и параметра потока отказов как

$$q_2(t) = (f_{\Sigma} - 1)(t_1 + \Delta t_2), \tag{6}$$

где $t_2 = t_1 + \Delta t_2$ – граница интервала $[0, t_2]$, на котором откажет второй элемент.

Положив $q_2(t) = 1$, определим

$$\Delta t_2 = \frac{1 - t_1 (f_{\Sigma} - 1)}{f_{\Sigma} - 1}. \quad (7)$$

Продолжив процедуру, определим отрезки $\Delta t_3, \Delta t_4$ и Δt_5 , а также верхние границы t_3, t_4 и t_5 отрезков $[0, t_3], [0, t_4]$ и $[0, t_5]$, на которых реализуются последующие отказы элементов.

С другой стороны, поскольку отказ каждого элемента увеличивает вероятность отказа системы на 0,2, то полученные времена обеспечивают возможность построить функцию распределения вероятности отказа системы, приведенную на рис. 3 сплошной линией. Там же пунктирной линией приведена функция распределения, построенная по статистике выполненного численного эксперимента.

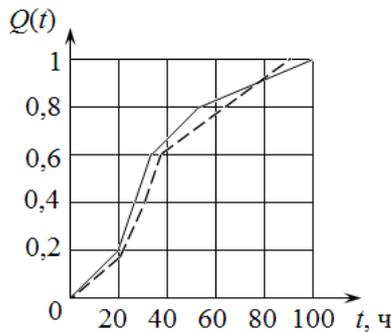


Рис. 3. Функции распределения вероятности отказа системы из 5 параллельно соединенных элементов, построенные при $f = 0,001 \text{ ч}^{-1}$:

- — — — расчет по методу без использования теоремы умножения вероятностей;
- — — — эксперимент по методу Монте-Карло

Fig. 3. The probability distribution functions for the system failure of 5 parallel-connected elements constructed at $f = 0,001 \text{ h}^{-1}$:

- — — — calculation by the method without using the theorem of probabilities multiplication;
- — — — Monte-Carlo experiment

Приведенные результаты показывают, это система может находиться в дискретных состояниях, исправном, неисправном, но работоспособном и в состоянии отказа. Состояния разделены дискретными событиями отказов элементов. Такое представление строго соответствует постулатам М. Планка [4]. Таким образом, при увеличении числа элементов в системе с раздельным резервированием ее наработка до отказа увеличивается вследствие увеличения вероятности, при выборе наугад, реализации в ее структуре элемента с наибольшей надежностью.

Механизм развития отказов в восстанавливаемых системах. Перейдем к рассмотрению восстанавливаемых резервированных систем. Механизм формирования отказов в восстанавливаемых системах существенно отличается. Рассмотрим результаты лабораторных ускоренных испытаний системы, приведенной на рис. 4 [9].

В качестве элементов использовались лампы накаливания. Ускорение режима испытания достигалось увеличением напряжения питания ламп. Перегоревшие лампы заменялись не сразу, а после некоторого времени для имитации времени полета с отказом в системе. Время полета с отказом $T_{\text{ПО}}$ принималось равным 4 мин. После установления стационарного режима отказов и замен ламп выполнена серия зачетных испытаний. Статистика испытаний обеспечила возможность определить плотность вероятности отказа ламп $f = 0,0159 \text{ мин}^{-1}$ и построить функцию распределения вероятности отказа системы, приведенную на рис. 5 сплошной линией.

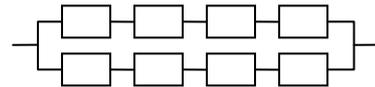


Рис. 4. Структурная схема системы с последовательным соединением

Fig. 4. The system structural scheme with serial connection

По разработанному в [8; 9; 14] методу, задавая возрастающий ряд значений вероятностей отказов элементов от 0 до 1, рассчитывались верхние границы интервалов $[0, t_1]$ и $[t_1, t_2^{\text{BOC}}]$ времени отказов первой и второй лампы за время полета с отказом. Здесь t_2^{BOC} – верхняя граница интервала, на котором отказывает восстанавливаемая система. Рассчитанные значения вероятности отказа системы показаны на рис. 5 пунктирной линией. Экспериментальная и расчетная функции представляются гладкими кривыми. При этом складывается впечатление о невыполнении постулата М. Планка. Здесь следует иметь в виду, что они построены по значениям наработок до отказа системы, т. е. по t_2^{BOC} . Если в расчете сразу положить $q(t) = 1$, то будет построена функция, приведенная на рис. 5 штрихпунктирной линией. При уменьшении $q(t)$ значения t_2^{BOC} этой функции опишут пунктирную линию, и каждому из них будут соответствовать значения t_1 верхней границы отказа первого элемента.

Напомним, что в надежности известны два основных плана испытания элементов. Это планы испытания невосстанавливаемых и восстанавливаемых объектов. Формы функций распределения вероятности отказов, соответствующие этим планам, приведены на рис. 6 [15].

При обоих указанных планах испытаний элементы отказывают вследствие износа (старение, деградация). Там же, на рис. 6, штрихпунктирной линией показана форма плотности вероятности восстанавливаемой (нестареющей) системы, соответствующей функции распределения на рис. 5.

Функция распределения восстанавливаемой системы (рис. 5) в теории и практике надежности получена впервые. Отказы таких систем не могут быть объяснены деградационными процессами. С деградацией связаны отказы элементов, но не восстанавливаемых систем [16; 17].

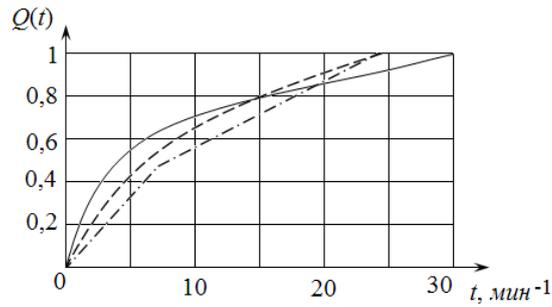


Рис. 5. Функции распределения вероятности отказа восстанавливаемой системы:
 ———— — эксперимент;
 - - - - - традиционный расчет;
 - · - · - расчет по методу [6; 7]

Fig. 5. The probability distribution function for the failure of the restored system:
 ———— — experiment;
 - - - - - traditional calculation;
 - · - · - calculation by the method [6; 7]

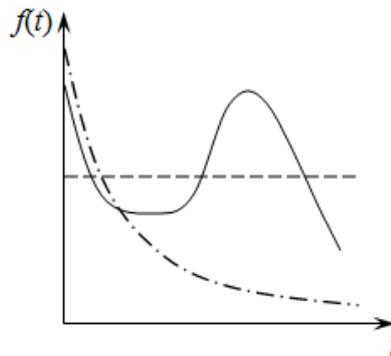


Рис. 6. Форма изменения плотностей вероятностей при испытаниях:
 ———— — план невосстанавливаемых объектов;
 - - - - - план восстанавливаемых объектов;
 - · - · - для восстанавливаемой системы

Fig. 6. The form of the change in the probability densities during testing:
 ———— — plan of non-renewable objects;
 - - - - - the plan of the restored objects;
 - · - · - for the rescue system

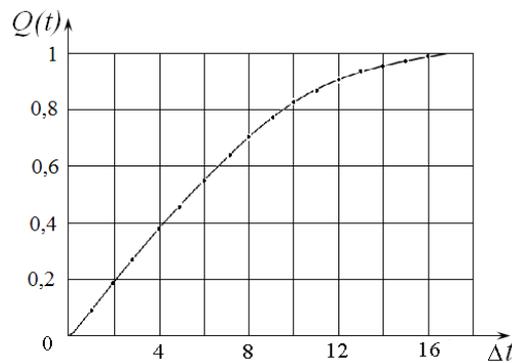


Рис. 7. Функция распределения вероятности отказов системы от протяженности отрезков между точками отказов ламп в системе

Fig. 7. The probability distribution function of system failures from the length of segments between the failure points of lamps in the system

Заключение. Механизм отказа нестареющих систем определяется двумя процессами. Первый процесс связан со случайным характером моментов времени отказов элементов в подсистемах, образующих систему. При этом временные интервалы между точками отказов элементов в подсистемах в процессе работы изменяются и смещаются друг относительно друга. Когда временной интервал между последовательными отказами элементов в подсистемах становится меньше времени $T_{\text{по}}$, реализуется отказ системы.

Второй процесс, определяющий характер изменения вероятности отказа системы $Q(t)$ от времени, является следствием распределения различных протяженностей отрезков времени между отказами элементов. Функция распределения вероятности $Q(t)$ от протяженности отрезков времени между точками отказов ламп в рассматриваемой системе приведена на рис. 7. Из рис. 7 совершенно очевидно, что по мере увеличения протяженности отрезков между точками отказов ламп плотность вероятности существенно уменьшается. Следовательно, отрезков меньшей длины существенно больше, чем отрезков большей длины. По этой причине плотность вероятности отказа системы уменьшается по мере увеличения наработки. В конечном счете, это приводит к уменьшению математического ожидания времени до отказа системы. Несмотря на это негативное следствие, надежность восстанавливаемых систем по сравнению с невозстанавливаемыми многократно возрастает с уменьшением $T_{\text{по}}$ и увеличением кратности резервирования.

Библиографические ссылки

1. Зосимов А. Г., Медведев В. Л., Шаймарданов Л. Г. Надежность функциональных систем длительно эксплуатирующихся самолетов гражданской авиации // Вестник СибГАУ. 2006. № 6(13). С. 107–112.
2. Утенков П. Г., Шаймарданов Л. Г. Особенности старения одноименных систем различных типов самолетов // Решетневские чтения : материалы XII Междунар. науч. конф. (10–12 нояб. 2008, г. Красноярск): в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2008. С. 178–179.
3. Шаймарданов Л. Г. Некоторые проблемы безопасности полетов и состояния самолетного парка гражданской авиации // Вестник СибГАУ. 2007 № 1(14). С. 84–87.
4. Tribus M. *Thermostatitics and Thermodynamics. An Introduction to Energy, Information and States of Matter, with Engineering Applications.* Princeton, New Jersey : D. Van Nostrand Company Publ., 1965. 504 p.
5. Бойко О. Г. Надежность функциональных систем самолетов гражданской авиации : монография. М. : РАН, 2009. 119 с.
6. Теория вероятностей : учебник для вузов / А. В. Печкин [и др.] ; под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 456 с.
7. Бойко О. Г., Шаймарданов Л. Г. Использование метода Монте-Карло для моделирования процесса изменения безотказности восстанавливаемых систем //

Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016. № 1. С. 100–104.

8. Shaimardanov L. G., Boyko O. G. New approach to reliability estimation of functional systems for civil aviation aircrafts. *International Russian-American Scientific // Actual problems of aviation and aerospace systems.* 2012. Vol. 17, No. 2(35). P. 28–33.

9. Бойко О. Г., Фурманова Е. А., Шаймарданов Л. Г. Экспериментальное исследование процесса изменения надежности восстанавливаемых систем // Надежность и качество : тр. Междунар. симпозиума. В 2 т. Т. 1. Пенза : ПГУ, 2014. С. 87–90.

10. Гнеденко Б. В. Математические методы в теории надежности. Основные характеристики надежности и их статистический анализ. М. : Наука, 1965. 524 с.

11. Bazovsky I. *Reliability. Theory and practice.* London : Prentice-Hall International Publ., 1961. 373 p.

12. Сугак Е. В. Надежность технических систем. Красноярск : Раско, 2001. 608 с.

13. Truelove A. J. Strategic reliability and preventive maintenance // *Operations Res.* 1961. Vol. 9, № 1. P. 22–29.

14. Фурманова Е. А., Бойко О. Г., Шаймарданов Л. Г. К вопросу о моделировании процесса отказов–восстановлений в функциональных системах самолетов гражданской авиации // Авиационное машиностроение и транспорт Сибири : сб. ст. IV Всерос. научн.-техн. конф. Иркутск : ИрГТУ, 2014. С. 154–162.

15. Воробьев В. Г., Константинов В. Д. Надежность и эффективность авиационного оборудования. М. : Транспорт, 1995. 245 с.

16. Шаймарданов Л. Г. Метод расчета надежности авиационных систем с индивидуальным резервированием агрегатов // Вестник СибГАУ. 2010. № 2 (28). С. 106–110.

17. Шаймарданов Л. Г. О правомерности использования условных вероятностей безотказной работы и условных плотностей вероятностей отказов в математических моделях надежности агрегатов // Вестник СибГАУ. 2010. № 2 (28). С. 113–116.

References

1. Zosimov A. G. Medvedev V. L. Shaimardanov L. G. [Reliability of functional systems of long-term civil aviation aircraft]. *Vestnik SibGAU.* 2006, No. 6(13), P. 107–112 (In Russ.).
2. Utenkov P. G., Shaimardanov L.G. [Aging features of similar systems of different aircraft types]. *Materialy XII Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XV Intern. Scientific. Conf "Reshetnev readings"]. Krasnoyarsk, 2008, P. 178–179 (In Russ.).
3. Shaimardanov L. G. [Some problems of flight safety and the state of the aircraft fleet of civil aviation]. *Vestnik SibGAU.* 2007, No. 1(14), P. 84–87 (In Russ.).
4. Tribus M. *Thermostatitics and Thermodynamics. An Introduction to Energy, Information and States of Matter, with Engineering Applications.* Princeton, New Jersey, D. Van Nostrand Company Publ., 1965, 504 p.
5. Boyko O. G. *Nadezhnost' funktsional'nykh sistem samoletov grazhdanskoi aviatsii: monografiya* [Reliability of civil aviation aircraft functional systems: monograph]. Moscow, RAN, 2009, 119 p.

6. Pechkin A. V., Teskin O. I., Tsvetkova G. M. *Teoriya veroyatnostei* [Probability Theory]. Moscow, Bauman MGTU Publ., 2004, 456 p.
7. Boyko O. G., Shaimardanov L. G. [Using the Monte-Carlo method to simulate the process of changing the reliability of recoverable systems]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*. 2016, No. 1, P. 100–104 (In Russ.).
8. Shaimardanov L. G., Boyko O. G. New approach to reliability estimation of functional systems for civil aviation aircrafts. *International Russian-American Scientific Actual problems of aviation and aerospace systems*. 2012, Vol. 17, No. 2(35), P. 28–33.
9. Boyko O. G., Furmanova E. A., Shaimardanov L. G. [Methodological approach and methods for assessing the likelihood of catastrophes due to failures of aircraft functional systems]. *Trudy Mezhdunar. simpozium "Nadezhnost' i kachestvo"* [Materials of the Intern. Symposium "Reliability and quality"]. 2014, Vol. 1, P. 84–87.
10. Gnedenko B. V. *Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti. Osnovnye kharakteristiki nadezhnosti i ikh statisticheskii analiz* [Mathematical methods in reliability theory. Basic characteristics of reliability and their statistical analysis]. Moscow, Nauka Publ., 1965, 524 p.
11. Bazovsky I. *Reliability. Theory and practice*. London, Prentice-Hall International Publ., 1961, 373 p.
12. Sugak E. V. *Nadezhnost' tekhnicheskikh system* [Reliability of technical systems]. Krasnoyarsk, Rasko Publ., 2001, 608 p.
13. Truelove A. J. Strategic reliability and preventive maintenance. *Operations Res.* 1961, Vol. 9, No. 1, P. 22–29.
14. Furmanova E. A., Boyko O. G., Shaimardanov L. G. [On the issue of modeling the failure-recovery process in the functional systems of civil aviation aircraft]. *Sb. statei IV Vseros. nauchn.-tekhn. konf. "Aviamashinostroenie i transport Sibiri"* [Materials of the IV All-Russian Scientific and Technical Conf. "Aircraft Engineering and Transportation of Siberia"]. Irkutsk, IrGTU Publ., 2014, P. 154–162 (In Russ.).
15. Vorob'ev V. G., Konstantinov V. D. *Nadezhnost' i effektivnost' aviatsionnogo oborudovaniya* [Reliability and efficiency of aviation equipment]. Moscow, Transport Publ., 1995, 245 p.
16. Shaimardanov L. G. [Method for calculating the reliability of aviation systems with individual redundancy of aggregates]. *Vestnik SibGAU*. 2010, No. 2(28), P. 106–100 (In Russ.).
17. Shaimardanov L. G. [On the legitimacy conditional probability using of failure-free operation and conditional probability density of failures in aggregates reliability mathematical models]. *Vestnik SibGAU*. 2010, No. 2(28), P. 113–116 (In Russ.).